

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВОДОРОДА НА СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА

**В. В. Яковлев,**

аспирант

**Д. А. Огорелков,**

аспирант

**В. И. Миронов,**

доцент

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург

**Аннотация.** В решении физико-механической задачи по расчету прочности металлоконструкций используются данные об изменении свойств материала под действием эксплуатационных факторов. Экспериментальное получение таких данных является самостоятельной актуальной проблемой, если одновременно протекает несколько связанных деградационных процессов. В статье рассматривается принципиальная возможность определения параметров такого процесса под влиянием температуры и водорода. В силовом подходе используются литературные данные и результаты испытаний отожженных образцов стали 09Г2С при наводороживании методом Сиверта.

**Ключевые слова:** металлоконструкция, водород, температура, схема, материал.

## INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HYDROGEN ON MATERIAL PROPERTIES

**Abstract.** In solving the physical and mechanical problem of calculating the strength of metal structures, data on changes in material properties under the action of operational factors are used. The experimental acquisition of such data is an independent topical problem if several associated degradation processes occur simultaneously. The article discusses the fundamental possibility of determining the parameters of such a process under the influence of temperature and hydrogen. The force approach uses literature data and test results of annealed 09G2S steel samples during hydrogenation by the Sievert's method.

**Keywords:** metal structure, hydrogen, temperature, scheme, material.

**Введение.** Явление водородной деградации эксплуатационных свойств сталей, обнаруженное более 100 лет назад, в последние десятилетия привлекает особое внимание. В статье рассматривается возможность построения схемы перехода пластичного материала в хрупкое состояние по аналогии со схемой Иоффе для низкотемпературного перехода. Для оценки состояния материала предлагается использовать полную диаграмму деформирования (ПДД) с падающей до нуля ветвью. Предполагается, что сравнение ПДД образцов в исходном и наводороженном состояниях даст более обстоятельную оценку изменения всего комплекса механических свойств материала от действия водорода.

### Схема перехода пластичного материала в хрупкое состояние при понижении температуры

Водород используется как в криогенной технике, так и в высокотемпературных установках. Потому важно иметь данные о влиянии температуры на механические свойства конструкционных материалов в широком диапазоне ее изменения.

Известная схема Иоффе иллюстрирует переход пластичного материала в хрупкое состояние при понижении температуры (рис. 1,  $T$  — шкала отрицательных температур) [1].

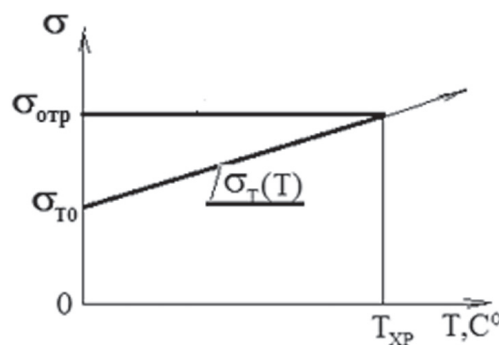


Рис. 1. Схема Иоффе для низких температур

На основании экспериментальных данных принималось, что при неизменном напряжении отрыва  $\sigma_{\text{отр}}$  снижение температуры испытаний приводит к росту предела текучести сталей  $\sigma_T(T)$ , а пересечение соответствующих зависимостей определяет температуру вязко-хрупкого перехода  $T_{\text{хр}}$ . Дальнейшее понижение температуры приводит к повышению обоих показателей и разру-

шению металла без пластических деформаций и заметного изменения модуля упругости. Данная схема неоднократно видоизменялась, уточнялась, но значение температуры вязко хрупкого перехода оставалось важным ориентиром в расчетах металлоконструкций. Особенно при выборе подходящего критерия прочности материала и прогнозировании возможного сценария разрушения элемента конструкции.

### Схема перехода пластичного материала в хрупкое состояние под действием водорода

Не меньшее практическое значение имеет концентрация вязко-хрупкого перехода  $c_{xp}$  при низкотемпературном электрохимическом наводороживании сталей. Водород по диффузионному механизму интенсивно проникает в растянутые зоны и менее интенсивно в сжатые зоны конструкции и вызывает деградацию прочностных свойств материала (рис. 2).

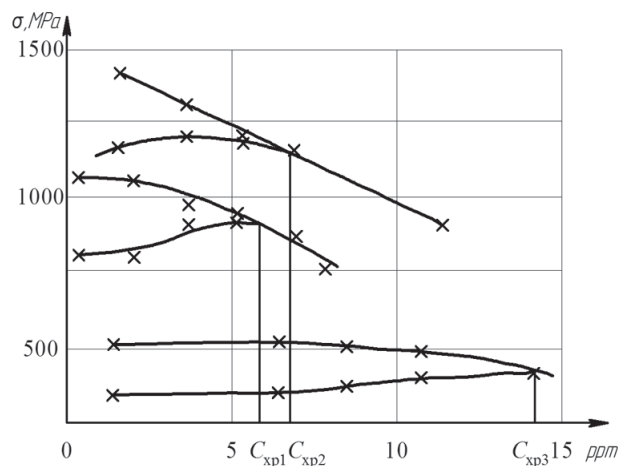


Рис. 2. Диаграмма влияния концентрации водорода: 1 — закаленная сталь 25ХНМА; 2 — отожженная сталь ШХ15; 3 — отожженная сталь 20 [2]

Левее точки пресечения кривых  $\sigma_B(c)$  и  $\sigma_T(c)$ , определяющей значение концентрации водорода  $c_{xp}$ , располагается область вязких разрушений материала, правее — область хрупких разрушений. Такая схема наглядна и хорошо описывает феноменологию вязко-хрупкого перехода в сталях при наводороживании. Если в схеме Иоффе определяющим фактором перехода была температура, то в данной схеме это концентрация водорода [3]. Если условия проведения испытаний образцов будут близкими к конкретным условиям эксплуатации конструкции, то знание  $c_{xp}$  будет полезным. Если принять гипотезу единой кривой, то схему можно использовать в расчетах элементов конструкций, работающих при невысоких (до 200 °С)

температурах. В этом случае выбор напряжений  $\sigma_B(c)$  и  $\sigma_T(c)$  в качестве параметров, контролирующих процесс вязко-хрупкого перехода в сталях, представляется вполне обоснованным.

### Высокотемпературное наводороживание по методу Сивертса

В случае высокотемпературного наводороживания по методу Сивертса ситуация осложняется в виду двоякого влияния температуры на свойства материала. Повышение температуры испытаний приводит к значительной деградации упругих и прочностных свойств конструкционных материалов [4]. С другой стороны, растет коэффициент диффузии и, следовательно, скорость изменения свойств. В наших испытаниях оценивался вклад водорода в снижение обратимых свойств стали 09Г2С при разной температуре наводороживания при постоянном давлении [5].

Испытания на растяжение малых тонкостенных образцов в жестком нагружающем устройстве позволяют оценить прочность, пластичность, трещиностойкость и энергоёмкость материала по соответствующим параметрам полной диаграммы деформирования (ПДД) [6]. Испытания образцов на растяжение после вакуумного отжига и после наводороживания проводились на разрывной машине Instron 8801. Диаграмма (1) на рис. 3 построена без наводороживания при температуре 20 °С, диаграмма (2) для образцов, наводороженных при температуре 580 °С, а диаграмма (3) при температуре 900 °С в течение 2,5 часов. Наблюдается снижение предела прочности, некоторое снижение предела текучести, энергоёмкости и располагаемой пластичности стали. Качественно полученный результат согласуется с данными рис. 2, получен-

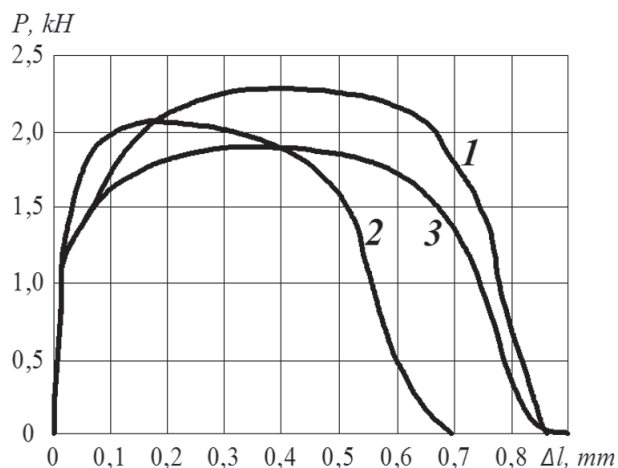


Рис. 3. ПДД стали 09Г2С: 1 — отожженный образец; 2, 3 — наводороженные образцы при температуре 580 и 900 °С и давлением 5 МПа

ными при невысокой температуре и электрохимическом наводороживании. Концентрация водорода в образцах не определялась, поэтому обоснование правомерности построения концентрационно-механических поверхностей (по аналогии с термомеханическими поверхностями) при фиксированных высоких температурах остается предметом дальнейших исследований.

**Заключение.** В силовом подходе процесс дегерации стали под действием водорода может контролироваться пределом прочности. Кинетическая кривая процесса  $\sigma_b(c)$ , выраженная в тер-

минах напряжений, согласуется с уравнениями механической задачи по определению напряженного состояния конструкции. При концентрации водорода в точке элемента конструкции меньшей  $c_{xp}$  условия разрушения будут определяться интенсивностью касательных напряжений, а при большей концентрации — интенсивностью нормальных напряжений. Поскольку до настоящего времени нет надежной и экспериментально подтвержденной теории водородной хрупкости металлов, то феноменологический подход к проблеме остается актуальным.

#### Список литературы

1. Иоффе А. Ф. Физика кристаллов. Л., 1929.
2. Дубовой В. Я., Романов В. А. Влияние водорода на механические свойства стали // Сталь. 1947. Т. 7, № 8. С. 727–732.
3. Миронов В. И., Яковлев В. В. Критерии водородной прочности металлической конструкции : сб. ст. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. С. 157–159. // Электронный научный архив УрФУ. URL: <http://hdl.handle.net/10995/80555>.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967. 599 с.
5. Effect of hydrogenation temperature and tensile stress on the parameters of the complete deformation diagram for steel 09G2S / V. I. Mironov, I. G. Emelyanov, L. M. Zamaraev et al. // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2020. Iss. 1. P. 16–27. DOI: 1017804/2410–9908.2020.1.024–033.
6. Емельянов И. Г., Миронов В. И. Долговечность оболочечных конструкций. Екатеринбург : УрО РАН, 2012. 217 с.